



Les émissions de CO₂ du Brésil - L'impact du secteur UTCATF (usage des terres, changement d'affectation des terres et foresterie)

Jérôme Trotignon

► To cite this version:

Jérôme Trotignon. Les émissions de CO₂ du Brésil - L'impact du secteur UTCATF (usage des terres, changement d'affectation des terres et foresterie). 2012. halshs-00746524

HAL Id: halshs-00746524

<https://shs.hal.science/halshs-00746524>

Preprint submitted on 29 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

W P 1232

**Les émissions de CO₂ du Brésil
L'impact du secteur UTCATF (usage des terres,
changement d'affectation des terres et foresterie)**

Jérôme Trotignon

October 2012

GATE Groupe d'Analyse et de Théorie Économique Lyon-St Étienne

93, chemin des Mouilles 69130 Ecully – France

Tel. +33 (0)4 72 86 60 60

Fax +33 (0)4 72 86 60 90

6, rue Basse des Rives 42023 Saint-Etienne cedex 02 – France

Tel. +33 (0)4 77 42 19 60

Fax. +33 (0)4 77 42 19 50

Messagerie électronique / Email : gate@gate.cnrs.fr

Téléchargement / Download : <http://www.gate.cnrs.fr> – Publications / Working Papers

Les Emissions de CO₂ du Brésil

- L'impact du secteur UTCATF (usage des terres, changement d'affectation des terres et foresterie) -

Jérôme Trotignon¹

Résumé

L'Equation de Kaya exprime les émissions de CO₂ d'un pays en fonction de facteurs économique, démographique et énergétique. Plusieurs travaux décomposent par période, à partir de cette équation, les effets sur les émissions brésiliennes des variables de population, de PIB par tête, d'intensité énergétique (contenu en énergie du PIB) et d'intensité carbonique (contenu en carbone de l'énergie). Mais ils ne tiennent pas compte des émanations de CO₂ engendrées par le secteur UTCATF. Pour pallier cet inconvénient et mieux éclairer les enjeux des politiques climatiques, nous proposons une analyse de décomposition des facteurs d'évolution des émissions qui inclut les statistiques du secteur UTCATF. Son influence dans la variation des émissions totales s'avère prédominante, aussi bien comme stimulant sur la période de déforestation massive de 1994-2000, que comme modérateur de 2000 à 2005, année où s'ébauche le programme de déforestation évitée.

Mots-clé : analyse de décomposition, Brésil, déforestation, équation de Kaya, facteurs d'émission de CO₂, intensité carbonique, intensité énergétique, secteur UTCATF

JEL : CO2, O54, Q23, Q54

CO₂ Emissions in Brazil

- The Role of LULUCF Activities (Land-Use, Land-Use Change and Forestry) -

The Kaya identity expresses carbon dioxide emissions of a country according to economic, demographic and energy factors. From this equation, several studies decompose into periods, the effects of the population, GDP per head, energy intensity (energy-to-GDP ratio) and carbon intensity (carbon-to-energy ratio) variables on Brazilian emissions. However, they do not take into account CO₂ emissions generated by the LULUCF activities. In order to fill this lack and to better highlight what is at stake with climate policies, we propose a decomposition analysis of the behavior of the driving factors of CO₂ emissions, including the LULUCF sector data. Its influence on the variation of total emissions proves determining, both as a stimulant over the period of massive deforestation of 1994-2000 and as a moderator from 2000 until 2005, the year when the avoided deforestation program was first drafted.

Key-words: Brazil, carbon intensity, decomposition analysis, deforestation, driving factors of CO₂ emissions, energy intensity, Kaya identity, LULUCF.

¹ Jérôme Trotignon, Université de Lyon, Lyon, F-69007, France ; CNRS, GATE Lyon Saint-Etienne, Ecully, F-69130, France.

Je tiens à remercier Philippe Polomé pour ses remarques et commentaires. Je conserve l'entière responsabilité d'éventuelles erreurs.

Introduction

Au cours de la décennie 2000, le Brésil renoue avec un cercle vertueux de croissance, caractérisé par une stabilité des prix, une baisse du chômage et une hausse des revenus réels. Il est sur le point de dépasser la France pour devenir la cinquième puissance économique mondiale en termes de PIB nominal. Il est aussi l'un des principaux pays émetteurs de gaz à effet de serre (GES). Au même titre que les autres grands pays émergents, il constitue un acteur majeur des Conférences des Nations unies sur les changements climatiques. A l'occasion de la Conférence de Copenhague (2009), le gouvernement brésilien prend l'engagement de réduire les émissions de GES de 36 à 39 % à l'horizon 2020, non en valeur absolue mais par rapport aux émissions projetées sur cette année. Cette réduction par rapport à un scénario tendanciel de référence équivaut à une variation absolue située dans une fourchette de -1,8 % à +5 % par rapport à 1990. Cela constitue néanmoins un effort beaucoup plus conséquent que ceux annoncés par la Chine et l'Inde, dont les engagements ne portent que sur une baisse des émissions rapportées au PIB (Stern T., 2011). En décembre 2011, la Conférence de Durban établit un programme de négociation pour parvenir à un nouvel accord de type Kyoto et à de nouveaux engagements de réduction par pays, à appliquer au plus tard à partir de 2020. Au moment où s'engagent les discussions en ce sens, il paraît opportun d'identifier les déterminants des émissions du Brésil et d'analyser leur évolution à long terme, de façon à éclairer les enjeux des politiques climatiques présentes et à venir.

Les analyses des causes des émissions de CO₂ reposent souvent sur une décomposition par période des effets de différents facteurs. Elles s'appuient sur l'équation de Yoichi Kaya (1990), présentée dans les travaux du GIEC (2007). Cette égalité comptable exprime les rejets de CO₂ d'un pays ou d'une région en fonction de critères économique, énergétique et démographique. Les émissions résultent ainsi du produit de 4 variables : le PIB par habitant, la quantité d'énergie primaire consommée par unité de PIB (intensité énergétique), le contenu en CO₂ de l'énergie primaire (intensité carbonique), et la population. La méthode permet d'affecter à chaque déterminant la variation des émissions qui lui revient pour chacune des périodes, puis d'analyser les évolutions d'une période à l'autre.

Les travaux procédant à une décomposition des facteurs d'évolution des émissions du Brésil considèrent le CO₂ dégagé par les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture, du transport, du bâtiment et du traitement des déchets. Ces secteurs constituent une source importante d'émanation de dioxyde de carbone, en particulier pour le transport et l'industrie. C'est moins le cas du secteur de l'énergie, la production d'électricité reposant essentiellement sur l'hydraulique, ce qui explique des contenus en carbone de l'énergie et des besoins énergétiques de la croissance faibles comparés aux pays développés et aux autres BRIC. L'ensemble des secteurs mentionnés correspond en réalité à une partie minoritaire des émissions brésiliennes, lorsque l'on ajoute celles qui découlent du secteur UTCATF (utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie).

Pour 2004, le GIEC (2007) évalue la part des émissions forestières à 17,4 % du total des émissions mondiales de GES. La part du secteur UTCATF pour le Brésil correspond à plus

des $\frac{3}{4}$ des émissions de CO₂ de 2005 (cf. encadré 1). Lorsque l'on passe des statistiques traditionnelles aux statistiques incluant ce secteur, le Brésil se déplace du 7^{ème} au 4^{ème} rang dans le classement mondial des pays émetteurs. Cela est propre aux pays en développement dont les forêts primaires subissent des pertes importantes. Le même raisonnement fait passer l'Indonésie de la 13^{ème} à la 5^{ème} place mondiale². Dès lors, il convient d'ajouter le secteur UTCATF aux autres dans l'analyse des causes de variation des rejets de CO₂, même si les marges d'erreur dans la mesure de ses émissions demeurent significatives. C'est ce que nous entreprenons dans ce travail, au travers d'une étude de décomposition portant sur les périodes 1994-2000 et 2000-2005. La mise en œuvre de la détection de la déforestation par satellite au Brésil permet aujourd'hui la réalisation d'une telle étude, mais sans qu'il soit possible de traiter les périodes antérieures.

Dans une première partie, nous présenterons l'équation de Kaya, les travaux de décomposition des facteurs d'émission qui s'en inspirent sur le cas brésilien, ainsi que les spécificités de l'évolution des intensités carbonique et énergétique du Brésil. Dans la seconde partie, nous montrerons comment la prise en compte du secteur UTCATF dans une analyse de décomposition éclaire les enjeux des politiques climatiques.

1- L'équation de Kaya et son application au cas brésilien

A l'origine de l'équation de Kaya, on trouve une équation d'impact environnemental, appelée communément « IPAT ». Elle est formulée à l'occasion d'une controverse entre Ehrlich P. R. et Holdren J. P. (1971, 1972) et Commoner B. (1972) sur le rôle de la croissance démographique dans la dégradation du milieu naturel. L'équation IPAT exprime l'impact environnemental d'un polluant comme suit :

$$I = P \times A \times T$$

Où :

I représente la quantité d'émissions du polluant considéré

P la population

A la richesse³, formalisée par la production par habitant

T les émissions du polluant par unité produite, dépendantes de la technologie utilisée

L'équation de Kaya utilisée dans les travaux du GIEC (Rogner H. et alii, 2007) reprend l'égalité IPAT en considérant l'impact environnemental des émissions de CO₂. De plus, elle scinde la composante technologique en deux facteurs, l'intensité énergétique (IE) et l'intensité carbonique (IC). L'intensité énergétique est la consommation d'énergie primaire (EP) par unité de produit intérieur brut (PIB), soit l'inverse de la productivité du facteur énergie. L'intensité carbonique est le contenu en énergie fossile d'une unité de consommation d'énergie primaire.

² Source : CAIT (Climate Analysis Indicators Tool) – WRI (World Resources Institute), année 2005 pour le Brésil et l'Indonésie.

³ A pour le terme anglais *Affluence*.

L'équation de Kaya est donc la suivante :

$$\text{CO}_2 = P \times \text{PIB}_H \times \text{IE} \times \text{IC}$$

Avec : $\text{PIB}_H = \text{PIB} / P$
 $\text{IE} = \text{EP} / \text{PIB}$
 $\text{IC} = \text{CO}_2 / \text{EP}$

A partir de cette équation, les effets des différentes variables et leur évolution dans le temps peuvent être étudiés quelle que soit l'échelle géographique choisie (ville, région, pays, Monde). Depuis les années 70, à l'échelle mondiale, les variations de la population et du PIB par tête sont décrites par le GIEC comme deux puissants facteurs d'augmentation des émissions. Le lien positif et de long terme entre le produit par habitant et l'impact écologique contredit la courbe environnementale de Kuznets, qui semble vérifiée pour certains polluants locaux mais pas pour les émissions de CO₂ (Grossman G. et Krueger A., 1995, Meunier A., 2004). Les effets démographique et de richesse sont partiellement compensés par la baisse de l'intensité énergétique consécutive au 1^{er} choc pétrolier, et par celle de l'intensité carbonique des années 80 et 90.

La présentation proposée par Y. Kaya pose clairement l'enjeu : quel doit être l'effort d'investissement supplémentaire dans la transformation du système énergétique, dans la mesure où les progrès enregistrés dans l'efficacité énergétique et la décarbonisation de l'énergie n'ont pas suffi à contrebalancer l'impact des autres variables ? La réduction absolue des émissions de CO₂ prônée par le GIEC à l'horizon 2050 pour éviter une augmentation de plus de 2° de la température implique que les deux derniers facteurs de l'équation diminuent à un rythme supérieur à celui de la hausse des deux premiers. La difficulté est d'autant plus ardue que de récentes analyses (Raupach et alii, 2007) mettent en évidence un tassement dans la diminution des facteurs technologiques sur la décennie 2000.

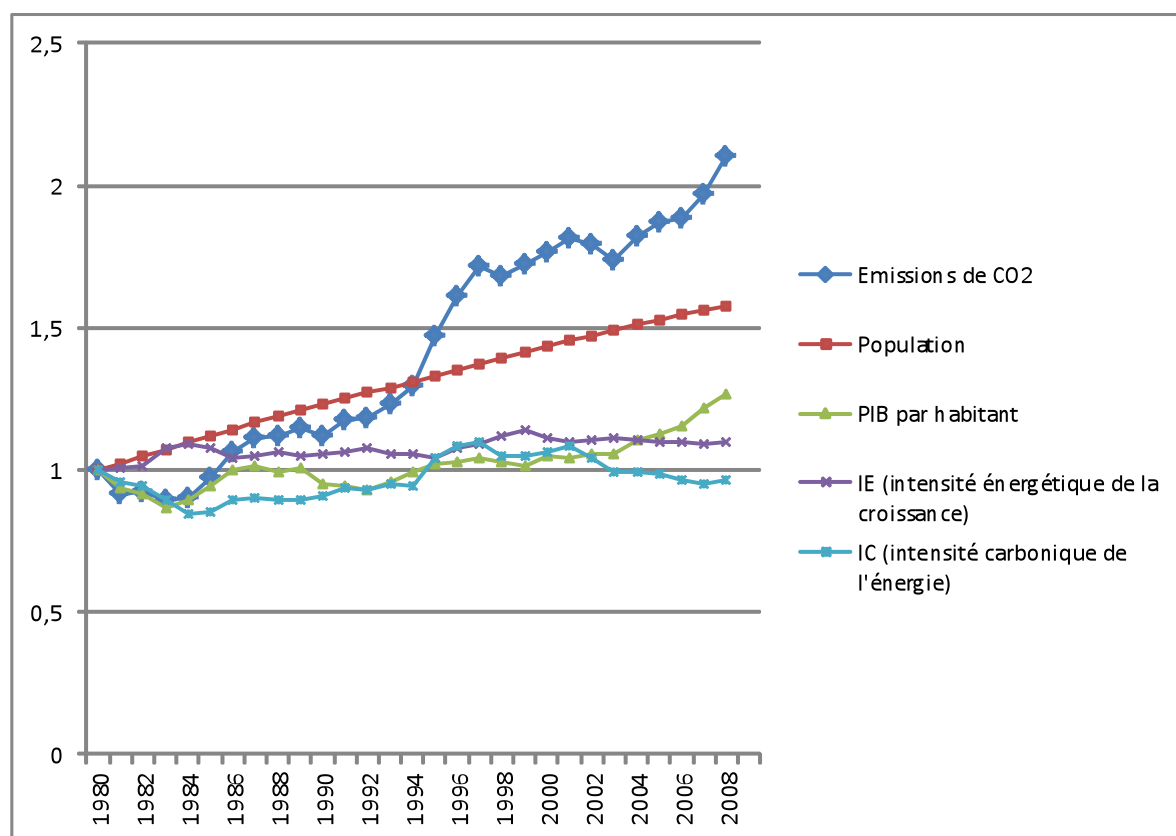
Les travaux s'appuyant sur l'équation de Kaya procèdent généralement à une décomposition par période des effets des différents facteurs sur les émissions de CO₂. On peut ainsi affecter à chaque facteur la variation des émissions qui lui incombe, puis analyser les évolutions d'une période à l'autre (Criqui P. et alii, 2010). L'effet de chacun des facteurs est calculé toutes choses égales par ailleurs, les autres restant inchangés. Plusieurs décompositions sont possibles. On peut par exemple prendre la valeur fixe des autres facteurs l'année de départ (méthode de Laspeyres à pondération constante) ou l'année d'arrivée (méthode de Paasche à pondération variable). Mais elles laissent apparaître des résidus importants, soit des variations qui ne seraient pas attachées à un facteur particulier mais à l'interaction entre plusieurs d'entre eux. La somme des émissions attribuées à chaque facteur serait alors sous-estimée ou surestimée (Rormose P. et Olsen T., 2005). La méthode aujourd'hui privilégiée, et qui évite cet écueil, est celle successivement élaborée par Divisia F. (1926), Törnqvist et alii (1985), et Ang B. W. (2004). Elle est connue sous le nom de LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index). Nous l'exposerons en détail en seconde partie.

Les analyses de décomposition des causes de variation des émissions de CO₂ sont peu nombreuses sur le cas brésilien. Elles présentent l'évolution de la population comme un déterminant significatif et régulier de leur hausse, en dépit d'un léger tassement dû à l'entrée du Brésil dans la seconde phase de sa transition démographique. A l'image de Souza de Medeiros H. et Arduino Dezidera D. (2006), et de De Freitas L. et Kaneko S. (2011a), elles identifient le produit intérieur brut par habitant comme une autre cause importante d'augmentation des émissions, excepté pendant les périodes de récession. Elles mentionnent l'intensité énergétique comme un déterminant de leur hausse du début des années 80 à la fin des années 90, alors que l'intensité carbonique joue souvent un rôle modérateur. Bacon R. et Bhattacharya S. (2007) et Kojima M. et Bacon R. (2009) font remarquer qu'en Chine et en Inde, l'intensité énergétique constitue au contraire un facteur de diminution des émissions.

Le graphique 1 permet de visualiser les comportements des facteurs de l'équation et d'en appréhender les tendances récentes. Afin d'en faciliter la lecture, nous avons ramené toutes les variables à 1 en 1980. La population connaît une évolution très régulière, ce qui n'est pas le cas du PIB par habitant. Dès lors, il apparaît que les rejets en CO₂ sont influencés par les aléas conjoncturels. En témoigne le cheminement similaire des deux courbes d'émissions et de PIB par tête sur certains épisodes caractéristiques du cycle de croissance du Brésil : intervention du FMI suite à la crise de la dette extérieure (début de la décennie 80), Plan Cardoso (milieu de la décennie 90 où toutes les variables jouent d'ailleurs à la hausse), et activité économique soutenue à cheval entre les deux mandats de Lula (2004-2008). Ces éléments traduisent une absence de découplage entre la croissance et les émissions. La question est cependant posée par De Freitas L. et Kaneko S. (2011b), qui évoquent un possible début de découplage en s'appuyant sur des données de l'année 2009.

La politique énergétique brésilienne connaît, dans les dernières décennies, de profondes transformations, en particulier depuis la survenance du 1^{er} choc pétrolier. En 1974, le 2^{ème} Plan national de développement met l'accent sur le secteur de l'énergie pour réduire la dépendance extérieure. Il oriente les investissements vers la recherche de gisements pétroliers, le renforcement du secteur hydroélectrique et le démarrage du programme Proalcool (1975) de fabrication d'éthanol à partir de canne à sucre. Ces deux dernières initiatives produisent pleinement leurs effets au début de la décennie 80, période où l'intensité carbonique de l'énergie marque une inflexion (cf. graphique 1). Mais le contre-choc pétrolier du milieu des années 80 associé à une montée des cours du sucre stoppe l'expansion de la production d'agrocarburant, qui ne reprend son essor qu'à l'occasion du lancement des véhicules à moteur flex-fuel (2003). Il s'agit d'un moteur capable de fonctionner avec n'importe quel mélange d'essence et d'éthanol ou avec de l'éthanol pur. Cette innovation donne au consommateur le libre-choix de son carburant, au gré de l'évolution des prix de l'essence normale (qui contient déjà de 20 à 25 % d'éthanol) et de l'essence à base de canne. Cela explique son succès, comparé à l'ancien moteur à éthanol pur.

Graphique 1 Les Facteurs d'évolution des émissions de CO₂ (1980-2008)



Source : World Development Indicators, <http://databank.worldbank.org/ddp/home.do>

Unités : émissions de CO₂ en kilotonnes, PIB en milliers de dollars PPA 2005, intensité énergétique en kilos d'équivalent pétrole d'énergie primaire par millier d'unités de PIB (dollars PPA 2005), intensité carbonique en kilos de CO₂ par kilo d'équivalent pétrole d'énergie primaire ; les séries sont reconstituées en ramenant toutes les variables à 1 en 1980.

Les deux secteurs de l'hydroélectricité et des dérivés de la canne à sucre voient donc leur part augmenter dans le mix énergétique brésilien depuis les années 70, pour représenter en 2010 près d'un tiers de l'offre interne d'énergie⁴. L'exploitation de la bagasse de la canne assure l'autonomie en électricité des producteurs d'éthanol, dont la revente des excédents au réseau public joue un rôle croissant. Ils y sont d'ailleurs incités dans le cadre programme Proinfa (programme d'incitation aux énergies électriques alternatives). La part de la biomasse forestière (bois et charbon végétal) dans l'offre interne décline, tandis que celle des énergies fossiles reste majoritaire (Ministerio de Minas e Energia, 2011).

La décennie 2000 est marquée par l'encouragement de la production d'électricité au gaz, par l'usage du gaz dans les transports, et son acheminement de Bolivie vers les habitations des Etats de Sao Paulo et de Rio. L'utilisation plus importante de cette ressource⁵ ainsi que le

⁴ Quantité d'énergie mise à disposition du marché interne pour être soumise à transformation ou consommation finale (quantité d'énergie importée comprise et exportée non comprise).

⁵ Le Gaz Naturel Véhicules (ou GNV) est un nouveau carburant pouvant alimenter les moteurs des véhicules. On compte déjà 4 millions de véhicules fonctionnant au GNV dans le Monde, dont 2 millions au Brésil et en

nouvel élan de la filière éthanol jouent en faveur de la diminution de l'intensité carbonique au cours de la dernière décennie (cf. graphique 1 et Medeiros H. et Arduino Dezidera D. - 2006). Selon l'évaluation de P. Crutzen et alii (2008), qui tient compte de l'utilisation d'engrais azotés, l'éthanol de canne permet, contrairement à celui issu du maïs ou du colza, d'économiser des gaz à effet de serre par rapport à un carburant fossile. Plus de 9 voitures produites sur 10 sont aujourd'hui des véhicules flex-fuel, et leur achat est fiscalement encouragé.

Intéressons-nous maintenant à l'évolution de l'intensité énergétique. En période de récession, celle-ci a tendance à augmenter, car la rétraction de l'échelle de production ne s'accompagne pas d'une diminution équivalente des capacités utilisées et de la consommation d'énergie primaire des entreprises. Ce phénomène est caractéristique des premières années de la décennie 80 (plan de stabilisation du FMI) et des dernières années de la décennie 90 (contagion des crises asiatique et russe et crise du real). Au-delà de ces facteurs conjoncturels, la progression du ratio EP/PIB, sur la période 1980-2008, même si elle est modérée, traduit une négligence dans la gestion énergétique (non remplacement des équipements obsolètes, manque d'entretien, déperdition, ...). Jusqu'au début de la décennie 90, celle-ci est influencée par le maintien de prix peu élevés de l'énergie par les pouvoirs publics, notamment ceux de l'électricité, souvent dans le but de contenir l'inflation.

Les évolutions décrites sont cependant de faible ampleur, et l'intensité énergétique brésilienne reste particulièrement basse pour un pays émergent. La sobriété énergétique du Brésil s'explique largement par la présence de l'hydraulique comme principale source de production nationale d'électricité (90 %). La prédominance de l'hydroélectricité permet l'obtention d'un taux de conversion élevé de l'énergie primaire en énergie finale, dans un rapport de l'ordre de 1 pour 0,9 (Machado G. et Schaeffer R., 2006). Notons également que les programmes gouvernementaux PROCEL (programme de conservation de l'énergie électrique créé en 1985) et CONPET (programme de rationalisation des usages des dérivés du pétrole et du gaz créé en 1993), menés respectivement par les firmes Eletrobrás et Petrobrás, contribuent à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Même si le Brésil se place parmi les pays les plus performants en termes d'intensités carbonique et énergétique, les marges de manœuvre restent significatives. C'est particulièrement vrai pour le transport, dont la consommation d'énergie par unité de PIB dépasse de très loin celle des autres secteurs. A eux seuls, les déplacements urbains concentrent la moitié des émissions du transport (De Gouvello C., 2010). Mais le potentiel de réduction, de loin le plus important, concerne le secteur forestier.

Argentine. Le GNV émet un autre GES, le méthane, mais le bilan en termes d'effet de serre est meilleur qu'avec un carburant traditionnel.

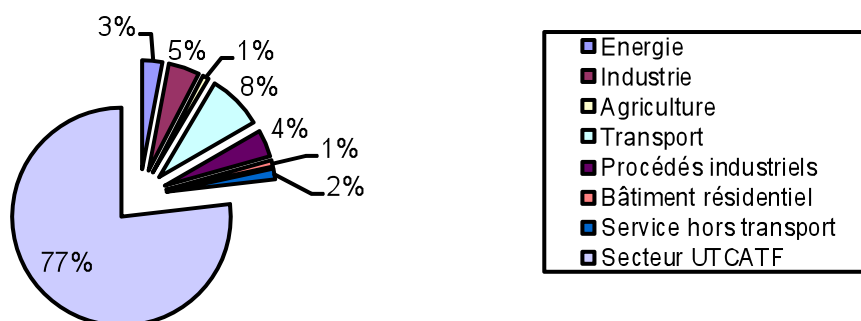
Encadré 1 La Déforestation et le secteur UTCATF

Dans la répartition sectorielle du GIEC, le secteur de la « foresterie » figure au côté de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture, des transports, du bâtiment (résidentiel et commerce) et du traitement des déchets. Sa contribution aux émissions mondiales brutes de gaz à effet de serre anthropiques est estimée à 17,4 % en 2004, dont plus de 95 % sous forme de dioxyde de carbone. Sont prises en compte les émissions issues de la déforestation, de la décomposition des résidus (biomasse de surface restante après exploitation forestière et déforestation), de la combustion des tourbes, et des résidus des tourbières drainées.

La déforestation est à l'origine de gaz à effet de serre pour deux raisons essentielles : la combustion et la décomposition. Le principal gaz concerné, est, de loin, le CO₂, mais du méthane et du protoxyde d'azote sont également émis. Dans les forêts primaires tropicales humides, le GIEC (2006, CH2) estime en moyenne à 50 % la proportion de biomasse brûlée à l'occasion des déforestations. Le reste de la biomasse non récoltée se décompose sur une dizaine d'années. Au cours de la décennie 90, 5,8 gigatonnes d'émissions de CO₂ par an seraient attribuables à la déforestation (Groupe de travail III, 2007). Ce dernier chiffre paraît cependant surestimé, le GIEC faisant reposer son évaluation à la fois sur des statistiques nationales compilées par la FAO et sur des données d'images satellite. Les études se basant uniquement sur la télédétection révèlent des chiffres largement inférieurs avec des marges d'erreur moins élevées (Caisse des dépôts, 2008, annexe 1, et Simonet G., 2011).

Alors que les chiffres précédents concernent les émissions brutes, le secteur UTCATF (utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie) permet d'effectuer un bilan net des émissions de CO₂. Il inclut le boisement, le déboisement, le reboisement, la restauration du couvert végétal, et la gestion des forêts, des terres cultivées et des pâturages (CCNUCC, 2006). Certaines activités sont génératrices d'émissions, comme les changements d'affectation des terres dus au défriche-brûlis ou au drainage des zones humides pour en faire des champs cultivés. D'autres stockent du carbone, comme les déprises agricoles et la reforestation. Au Brésil, la déforestation massive induit une forte représentation du secteur UTCATF dans les émissions de CO₂, comme en témoigne la figure 1. La précision associée aux données de cette figure est très variable selon les secteurs. La marge d'erreur (correspondant à un intervalle de confiance à 95 %) varie de ± 3 % pour l'énergie à ± 33 % pour l'UTCATF (Republica federativa do Brasil, 2010).

Figure 1 Les Emissions de CO2 par secteur (2005)



Source : calculs de l'auteur, d'après Ministério da Ciência e Tecnologia (2010), p. 165 et 270.

Note : le secteur de l'énergie inclut la combustion d'énergie fossile, les émissions fugitives et le traitement des déchets ; celui de l'industrie inclut la combustion d'énergie fossile et les usages non énergétiques ; les procédés industriels correspondent aux émissions hors combustion (ciment, verre, produits chimiques et sidérurgiques, ...) ; les services hors transport concernent les établissements commerciaux et publics.

2- La décomposition des facteurs d'évolution des émissions de CO₂ au Brésil : la prise en compte du secteur UTCATF

Les analyses de décomposition des facteurs d'évolution des émissions de CO₂ au Brésil que nous avons passées en revue en première partie ne tiennent compte que d'une part mineure des émissions, soit celles découlant des activités de production ou de consommation de biens et services. Celles du secteur UTCATF sont omises. La déforestation, au travers des pertes immédiates et de la décomposition des résidus (bois mort sur pied / hors pied, litière, ...), joue pourtant un rôle essentiel. En 2005, sur le total des pertes immédiates de biomasse, 96 % des bois font l'objet d'incendies volontaires destinés à aménager des terres pour l'élevage du bétail et l'agriculture, le reste étant destiné aux usages commerciaux (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010, p. 250). En tenant compte de la déforestation, les émissions de CO₂ du secteur UTCATF représentent chaque année plus des ¾ des émissions totales (cf. encadré 1).

En Amazonie, la déforestation massive remonte au début de la décennie 70, au moment de l'inauguration de la route transamazonienne. La surface forestière disparue dans cette région avant 1970 est légèrement supérieure à celle du Portugal, et celle supprimée depuis équivaut à la superficie de la France (Fearnside P. M., 2005). La région du Cerrado⁶ est également concernée : elle concentre 40 % des surfaces déforestées du Brésil depuis le milieu des années 90, contre 50 % pour la région amazonienne. Plus que l'exploitation du bois, c'est l'élevage bovin et la mise en culture de nouvelles terres qui en sont à l'origine. En Amazonie, environ les trois quarts des pertes sont dues aux activités d'élevage extensif et un cinquième aux activités culturelles (Center for Clean Air Policy, 2006). L'essor de la culture de la canne à sucre⁷ et plus encore du soja suscite une déforestation directe. Il l'induit également de façon indirecte, en déplaçant les éleveurs vers des zones boisées où le prix de la terre est moins élevé (Azevedo-Ramos C., 2008). La production d'éthanol, et aussi de biodiesel à base de soja, substitue alors des émissions traditionnelles par des émissions UTCATF. En dehors de l'exploitation du bois, le reste des pertes découle de l'extraction minière et des infrastructures, ces dernières étant d'ailleurs très souvent développées pour écouler les produits de l'agro-industrie. L'insécurité des droits de propriété foncière semble jouer un rôle non négligeable dans la disparition du couvert forestier. A partir de données de panel des 9 Etats de l'Amazonie légale et de la période 1988-2000, Araujo C. et alii (2009) montrent que le nombre des homicides résultant de conflits fonciers et les expropriations entreprises par l'INCRA (Institut national de la colonisation et de la réforme agraire) influencent positivement le taux de déforestation.

Nous nous proposons d'inclure les émissions de CO₂ du secteur UTCATF dans une analyse de décomposition. Leur mesure est soumise à une marge d'incertitude beaucoup plus importante que les émissions classiques. Trois dimensions interfèrent dans les calculs : la variation des surfaces forestières, le stock de carbone à l'hectare et les flux de carbone

⁶ Données INPE/PRODES. Le Cerrado rappelle par bien des aspects la savane africaine et recouvre 1/5^{ème} du territoire du Brésil dans sa région centrale.

⁷ Selon le Cepan (Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste), la production d'éthanol est directement responsable de 95 % de la déforestation de la forêt atlantique du Nord-Est.

générés. Le stock de carbone (biomasse aérienne et souterraine) est différent selon les écosystèmes forestiers et peut même varier au sein d'une même forêt. Le World Research Institute (WRI) propose une évaluation reposant sur le travail de Houghton R. A. (2003). Sur la période 1950-2000, il sélectionne 10 grandes régions du Monde et leurs principaux pays. Pour les pays tropicaux, les résultats annuels - basés sur des statistiques nationales compilées par la FAO - pourraient être surestimés du simple au double⁸. Le gouvernement brésilien dispose aujourd'hui de statistiques plus récentes et plus fiables, car elles s'appuient en amont sur des données satellitaires (cf. encadré 2). Grâce à la télédétection (LANDSAT), la marge d'erreur sur la mesure du taux de déforestation au Brésil a pu être réduite à 4 % (Caisse des dépôts, 2008). La marge s'appliquant à la mesure de la dégradation des forêts (qui correspond à leur exploitation sélective) lui est cependant supérieure.

Encadré 2 La télédétection de la déforestation par satellite

Le Brésil fait partie du cercle restreint des pays en développement utilisant la télédétection satellitaire pour la surveillance des forêts. Les satellites agissent comme des appareils photo, et les images sont analysées automatiquement de façon à ce que chaque pixel soit classé comme zone forestière ou non forestière. Grâce au satellite haute définition LANDSAT, il est possible de détecter les cas de déforestation d'une superficie supérieure à 0,5-1 hectare dans un délai de 3 à 5 jours, et ceux d'une superficie supérieure à 0,05 hectare dans un délai d'un mois, à condition que la zone déboisée ne soit pas masquée par les nuages. Cette dernière mesure correspond à la superficie minimale d'une forêt (entre 0,05 et 1 hectare) requise dans les recommandations du GIEC (2003) pour le secteur UTCATF.

Dans le cadre du programme PRODES (programme de calcul de la déforestation en Amazonie), l'Institut national de recherches spatiales (INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) publie depuis 1988 une estimation annuelle des taux de déforestation des 9 Etats amazoniens (<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>). Depuis 2002, ces estimations sont obtenues par un système de classification numérique d'images, qui recense toutes les catégories de déforestation supérieure à 6,25 hectares. Sur les cartes numériques, les taches vertes indiquent la forêt et les taches roses les zones déboisées. Un système de filtres appliqués aux cartes antérieures permet de détecter le type de déboisement occasionné (abattage d'arbres, prairie, incendie, ouverture de pistes, ...), avec une fiabilité supérieure à 80% (pourcentage de pixels identifiant correctement le couvert végétal). Le taux de déforestation divulgué pour l'année n correspond aux événements observés du mois d'août de l'année n-1 au mois de juillet de l'année n (BNDES, 2009). Au sein de l'INPE, le programme PRODES se distingue du système DETER (Detecção de Desflorestação em Tempo Real), qui lui vise à détecter la déforestation en temps réel, en vue d'interventions rapides auprès des contrevenants.

A l'occasion de la Conférence de Copenhague, le gouvernement brésilien fait réaliser un inventaire national des émissions de gaz à effet de serre, qui sert de base à la définition d'objectifs de réduction à l'horizon 2020 (República Federativa do Brasil, 2010). La méthode

⁸ Houghton R. A. (2003), *Data Note: Emissions (and Sinks) from Land-Use Change*, <http://cait.wri.org/downloads/DN-LUCF.pdf>

adoptée pour évaluer les émissions du secteur UTCATF est la plus élaborée parmi les trois recommandées par le GIEC (2003). Le degré d'incertitude des estimations est cependant de plus ou moins un tiers, cette fourchette constituant un intervalle de confiance à 95 % (República Federativa do Brasil, 2010, p. 260). Six catégories d'usage des terres (terres forestières, terres cultivées, prairies, zones humides, aires urbaines, autres) et leurs subdivisions sont retenues. Des images satellite couvrant les 6 grands biomes brésiliens identifient les différents usages par unité de surface en 1994 et en 2002. Est ainsi établie une matrice des changements d'affectation des terres de 1994 à 2002, puis calculée l'évolution correspondante des émissions nettes. Le calcul net permet de déduire la séquestration du carbone due à la reforestation, à la gestion des forêts et des prairies, et à la recomposition de forêts secondaires après déboisement. Les émissions des autres années (période 1990-2005) sont ensuite estimées en tenant compte des taux de déforestation des 6 biomes. L'estimation est annuelle pour le biome amazonien. Elle n'est pas annualisée pour les autres biomes, pour lesquels on ne dispose que de moyennes annuelles par période des taux de déforestation.

La prise en compte des émissions de CO₂ du secteur UTCATF nous conduit à exploiter l'équation de Kaya sous une forme différente de celle de la partie 1. Nous fusionnons les deux facteurs technologiques (CO₂/EP et EP/PIB) en un seul (CO₂/PIB), qui mesure la teneur en carbone de la valeur ajoutée. L'intensité carbonique représente le contenu en carbone de l'énergie primaire utilisée. Nous ne pouvions donc pas rajouter à ce contenu les émissions forestières, qui sont déconnectées de la consommation d'énergie. Par contre, nous devons les inclure dans le dénominateur du ratio CO₂/PIB, puisque la composante agropastorale du PIB s'appuie en bonne partie sur la déforestation. Cela revient à affecter les rejets de CO₂ du secteur UTCATF à l'activité agropastorale qui en est à l'origine.

En désignant par C le contenu en carbone de la valeur ajoutée, l'équation devient :

$$CO_2 = P \times PIB_H \times C$$

Avec : P la population

$$PIB_H = PIB / P$$

$$C = CO_2 / PIB$$

De plus, nous procédons à un découpage en 4 secteurs de l'économie (énergie, industrie, services, et agropastoral)⁹, de façon à isoler les activités agropastorales et à intégrer les changements sectoriels enregistrés au cours des périodes étudiées. Nous décomposons les effets des facteurs d'émission en utilisant l'équation suivante :

$$E_t = \sum_{i=1}^4 E_{it} = \sum_{i=1}^4 P_t \frac{PIB_t}{P_t} \frac{PIB_{it}}{PIB_t} \frac{E_{it}}{PIB_{it}}$$

⁹ Dans le calcul des PIB sectoriels, nous incluons les transports dans les services.

Où : E_t désigne les émissions totales de CO₂ à la date t
 E_{it} les émissions du secteur i à la date t
 P_t la population à la date t
 PIB_t la valeur ajoutée à la date t
 PIB_{it} / PIB_t la part du secteur i dans la valeur ajoutée à la date t
 E_{it} / PIB_{it} le contenu en CO₂ de la valeur ajoutée du secteur i à la date t

Nous utilisons la méthode LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index) sous sa forme additive. Entre les dates 0 et T, la variation des émissions totales (ΔE) découle de la somme des effets liés au changement de chaque facteur d'émission :

$$\Delta E = E_T - E_0 = \Delta ED + \Delta EG + \Delta ES + \Delta EC$$

Où : ΔED mesure l'effet démographique
 ΔEG mesure l'effet de richesse
 ΔES mesure l'effet structurel
 ΔEC mesure l'effet de l'intensité en émissions de CO₂ de la valeur ajoutée

L'effet structurel reflète les changements intervenant dans la répartition sectorielle de l'activité et leurs conséquences en termes d'émission. L'effet de l'intensité en CO₂ donne une indication sur la nature de la croissance économique, selon qu'elle se découple ou non des émissions ; nous présenterons l'effet global puis les effets détaillés par secteurs, en portant une attention particulière à l'activité agropastorale.

Les contributions des différents effets aux émissions totales s'obtiennent comme suit :

$$\Delta ED = \sum_{i=1}^4 L(E_{iT}, E_{i0}) \cdot \ln(P_T / P_0)$$

$$\Delta EG = \sum_{i=1}^4 L(E_{iT}, E_{i0}) \cdot \ln[(PIB_T / P_T) / (PIB_0 / P_0)]$$

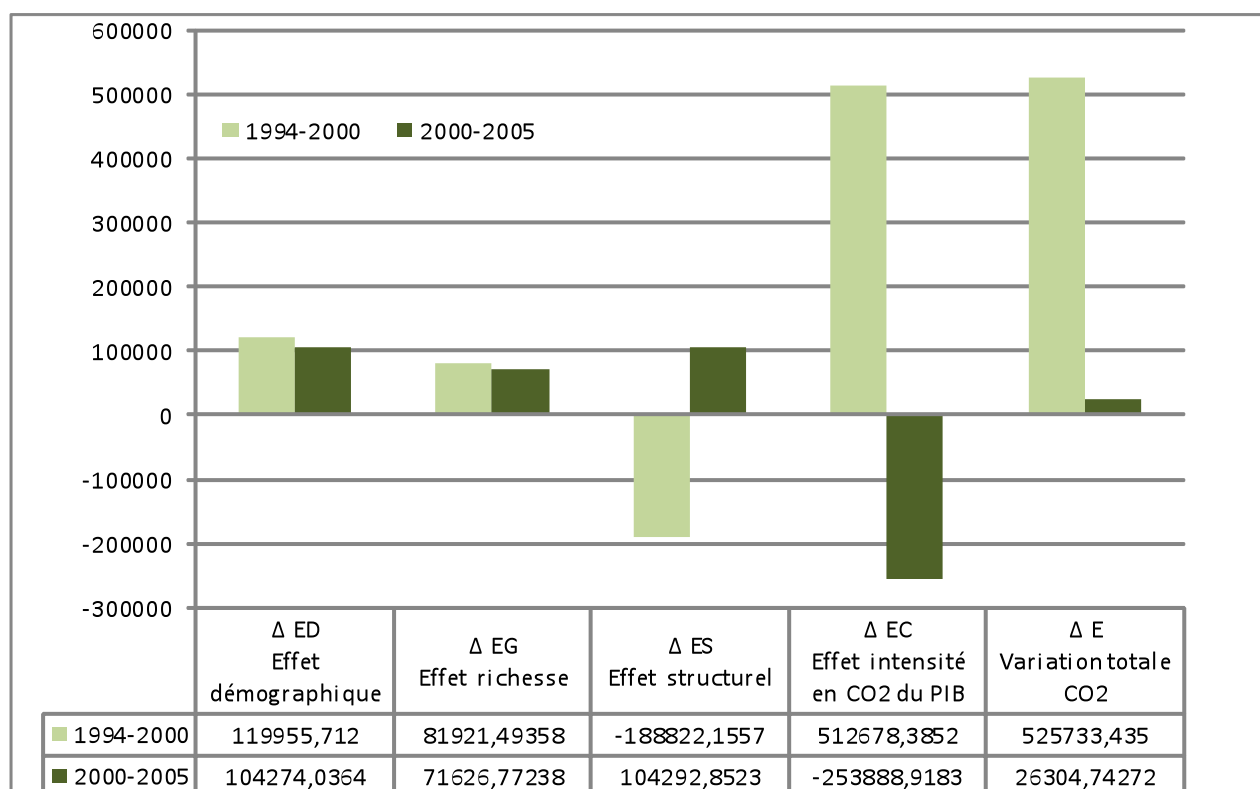
$$\Delta ES = \sum_{i=1}^4 L(E_{iT}, E_{i0}) \cdot \ln[(PIB_{iT} / PIB_T) / (PIB_{i0} / PIB_0)]$$

$$\Delta EC = \sum_{i=1}^4 L(E_{iT}, E_{i0}) \cdot \ln[(E_{iT} / PIB_{iT}) / (E_{i0} / PIB_{i0})]$$

Avec $L(E_{iT}, E_{i0}) = (E_{iT} - E_{i0}) / \ln(E_{iT} / E_{i0})$, soit la moyenne logarithmique des émissions du secteur i des dates 0 et T.

Les données de l'inventaire national des émissions de GES nous permettent de déterminer les rejets en CO₂ des différents secteurs d'activité. Nous affectons l'ensemble des émissions forestières anthropiques à l'activité agropastorale, qui en constitue l'origine essentielle. Les données de PIB globales et sectorielles sont exprimées en dollars constants de 2005 et proviennent de l'IBGE (Institut brésilien de géographie et statistiques). La décomposition porte sur les périodes 1994-2000 et 2000-2005, ce choix étant soumis à la disponibilité des données¹⁰. Les résultats sont présentés dans le graphique 2.

Graphique 2 : Décomposition des émissions de CO₂ du Brésil



En gigagrammes de CO₂, émissions du secteur UTCATF incluses

Les changements intervenant dans l'intensité en CO₂ du PIB constituent l'effet prédominant. Le CO₂ provenant du secteur UTCATF, dont on a vu qu'il représentait toujours plus des ¾ du total annuel, joue donc un rôle majeur. Ce rôle est différencié selon les périodes. La forte augmentation de la teneur en carbone de l'activité est à l'origine de la quasi-totalité des émissions de 1994-2000, alors que sa diminution neutralise les 3 autres effets sur la période 2000-2005.

¹⁰ Les données détaillées nécessaires à l'affectation des émissions aux 4 secteurs ne sont divulguées que pour quatre années (1990, 1994, 2000, 2005) dans l'inventaire national. Les deux périodes choisies permettent de tenir compte de l'évolution des taux de déforestation du Cerrado, dont on ne peut connaître que les moyennes annuelles sur les périodes 1990-1994, 1995-2002, et 2003-2005.

L'effet démographique est conforme aux résultats des études antérieures, avec une contribution positive et légèrement déclinante. L'effet de richesse a le même profil, la première période débutant avec la nette amélioration du revenu par tête du Plan Real. L'effet structurel atténue, puis amplifie les émissions totales. Durant la période 1994-2000, le secteur des services accroît sa part dans la valeur ajoutée au détriment des secteurs agricole et industriel. A la faveur de la relance des exportations de produits agricoles et des industries extractives, c'est l'inverse qui se produit au cours de la première moitié de la décennie 2000.

Tableau 1 Effet de l'intensité en CO₂ du PIB par secteur

	1994-2000	2000-2005
Agropastoral	469391,819	- 229124,078
Energie	180,692525	- 14912,2843
Industrie	38747,8915	- 15498,3172
Services	4357,98207	5645,77037
Total (ΔEC)	512678,385	- 253888,918

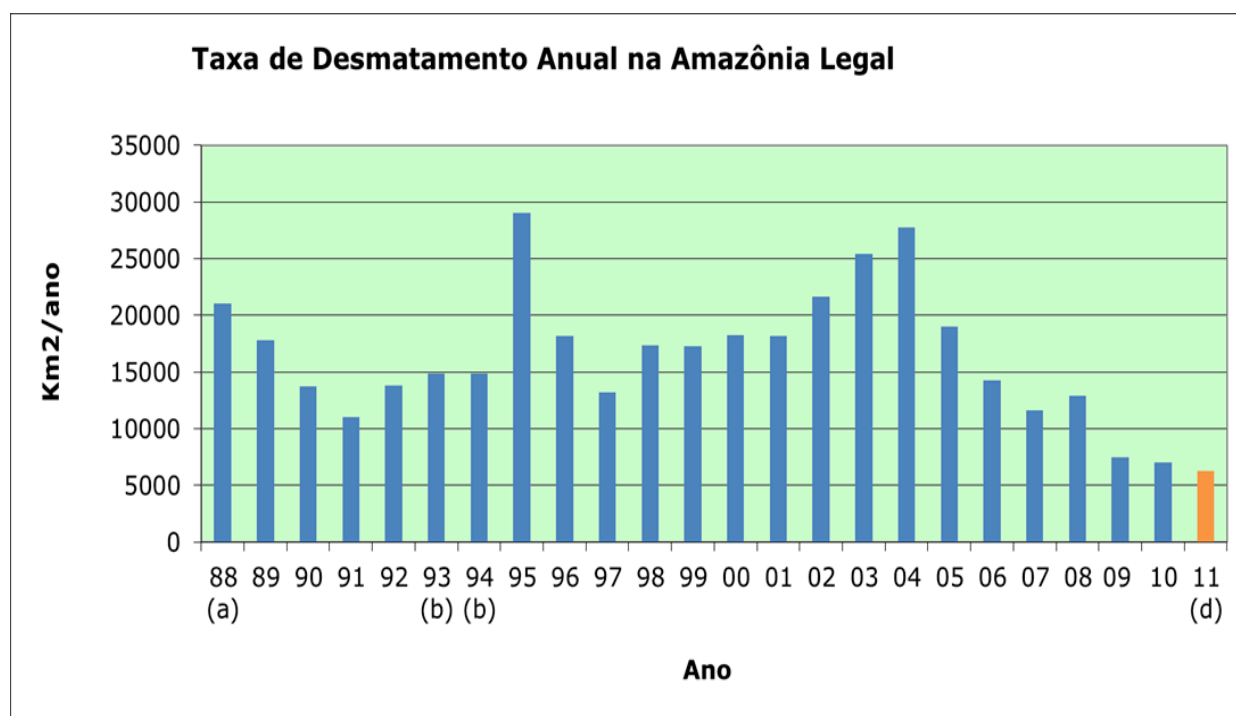
En gigagrammes de CO₂, secteur UTCATF inclus

L'effet de l'intensité en CO₂ de la valeur ajoutée (ΔEC) s'obtient en additionnant les effets des 4 secteurs d'activité. Sur les 2 périodes considérées, environ 90 % des variations d'émissions occasionnées sont attribuables à la seule activité agropastorale (d'après le tableau 1). Si cet effet sectoriel s'exerce de façon opposée d'une période à l'autre, c'est que les tendances de la déforestation évoluent. En augmentation sensible dans les 6 biomes au cours de la première période, elle stagne presque en Amazonie et diminue dans le Cerrado en seconde période. La hausse très modérée de la déforestation amazonienne de 2000 à 2005 résulte en réalité d'un net retournement de fin période (cf. graphique 3). Deux éléments y contribuent, le premier se référant aux politiques publiques et le second aux évolutions des prix agricoles.

Le Plan d'action pour le contrôle et la prévention de la déforestation en Amazonie (PCPDAm), lancé en 2004, semble produire ses premiers effets. Il intègre les autorités fédérales, étatiques et municipales dans une nouvelle forme de gestion du territoire. Le contrôle des activités forestières par télédétection est renforcé par la création du système DETER de l'INPE, et celle du CENAM (Centre pour la Surveillance de l'Environnement) au sein de l'IBAMA (Institut Brésilien pour l'Environnement et les Ressources Naturelles). Le système DETER (Detecção de Desflorestação em Tempo Real) déclenche des alertes en temps quasi-réel lorsqu'un déboisement de plus de 25 hectares est détecté par le satellite Terra. Cela permet à l'IBAMA de procéder à des interventions sur le terrain en coordination avec la police fédérale. Parallèlement à ces actions, la création de zones protégées (terres indigènes, zones militaires, unités de conservation sous protection et destinées à l'exploitation durable) s'accélère dès 2003. Elles couvrent aujourd'hui près de la moitié de la forêt

amazonienne. Mais 50 % de ces zones n'ont pas encore de plan de gestion approuvé, et certaines manquent cruellement de personnel ; l'état du Pará compte par exemple un employé pour 1 817 kilomètres carrés de forêt (Verissimo, A et alii, 2011).

Graphique 3 Taux de déforestation annuel en Amazonie (en km²)



Source : INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

(a) Moyenne 1977-1988

(b) Moyenne de 1993 et 1994

(d) Estimation

En 2005, la chute du taux de déforestation peut aussi s'expliquer par la baisse des prix du bétail et du soja. Sur la période 2000-2007, une corrélation est observée entre la déforestation amazonienne et le prix du soja, et dans une moindre mesure celui du bétail (Caisse des dépôts, 2008). Sur la période 2001-2003, Chomitz K. M. et alii (2006) mettent en évidence une corrélation étroite entre déforestation et prix du bœuf. La nette reprise des cours du soja en 2007 semble à l'origine du regain des défrichements enregistré au début l'année 2008. Les autorités brésiliennes prennent alors une série de mesures permettant une surveillance et un contrôle accru des zones critiques et l'octroi des crédits agricoles sous condition de présentation des preuves du respect de la législation environnementale. L'étude de Assunção J. et alii (2012), effectuée sur 380 municipalités à partir de données longitudinales pour la période 2002-2009, révèle que sans ces mesures, le taux de déforestation de 2007 à 2009 aurait augmenté alors qu'il a diminué. L'envolée du prix des matières premières agricoles depuis la mi-2010 ne s'est pas non plus traduite par un déboisement accru : les dernières

données divulguées par le PRODES pour 2011 et 2012 indiquent une poursuite de la baisse annuelle du taux de déforestation.

Un autre élément témoigne de l'amélioration apportée par les contrôles exercés dans le cadre du PCPDAm. Depuis que l'INPE dispose de données satellite annuelles (cf. graphique 3), les variations du taux de déforestation peuvent être comparées aux évolutions conjoncturelles. Ces variations sont souvent en phase avec l'activité économique. C'est le cas lorsque le retournement du cycle est prononcé, que ce soit en phase récessive (Plan Collor du début de la décennie 90) ou en phase de reprise (Plan Cardoso de lancement du Real en 1994-95). Mais ce phénomène ne s'observe pas sur la période 2006-2011, les années de forte croissance n'induisant pas une déforestation accrue. Le Brésil semble au contraire rentrer dans une période de déclin du taux de déforestation, ce qui, dans la théorie de la transition forestière (Mather A., 1992), préfigure une dernière phase de stabilisation et d'éventuelle expansion du couvert forestier. Mais le nouveau code forestier, adopté en 2012, pourrait contrarier cette évolution. Il prévoit en particulier la diminution de la « réserve légale » des terrains, soit celle qu'un propriétaire n'a pas le droit d'exploiter.

Conclusion

La revue de littérature des études de décomposition et les faits stylisés présentés en première partie montrent que l'effet démographique exerce une influence régulière sur l'augmentation des émissions de CO₂ du Brésil, alors que l'effet de richesse agit au gré de la conjoncture, la période d'intervention du FMI jouant à la baisse et la période récente nettement à la hausse. Le développement du programme Pro-alcool et du véhicule flex-fuel font tour à tour jouer à l'intensité carbonique un rôle modérateur de l'expansion des émissions. Les variations de l'intensité énergétique étant de moindre ampleur, elles n'exercent pas d'effets déterminants.

Les décompositions effectuées sur le cas brésilien n'intégraient jusqu'à présent que les émissions traditionnelles. En y ajoutant celles du secteur UTCATF, nous avons pu mettre en évidence aussi bien la responsabilité de la déforestation que le potentiel de réduction des politiques qui la contrôlent. Ce potentiel dépasse largement les perspectives d'amélioration des intensités énergétique et carbonique. Le plan du gouvernement brésilien de réduction des émissions de GES à l'horizon 2020 repose aux 2/3 sur la déforestation évitée par rapport à un scénario tendanciel des biomes de l'Amazonie et du Cerrado ; la promotion de l'efficacité énergétique et des sources renouvelables n'y participe que pour 18 % (Governo Federal, 2008). Cependant, la réduction des émissions forestières étant envisagée par rapport à une tendance d'évolution des émissions projetée sur l'année 2020, elle n'aboutit pas à une « déforestation zéro ».

Les résultats enregistrés par le Plan d'action pour le contrôle et la prévention de la déforestation en Amazonie sont encourageants. Les émissions évitées sur la période 2006-2010 par rapport à la période 2001-2005 représenteraient le double de l'engagement de réduction de l'Union européenne dans le cadre du protocole de Kyoto. Une douzaine d'années sans déforestation amazonienne équivaldrait, compte tenu du rythme de destruction actuel, à éviter l'équivalent des émissions annuelles de CO₂ du Japon.

L'enjeu dépasse le cadre national brésilien et devient planétaire. Il concerne d'ailleurs aussi bien le climat que la préservation de la biodiversité. Les pays développés seraient avisés d'anticiper la mise en œuvre du Fonds vert et de déterminer les financements du programme REDD (Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts). Cela dégagerait des ressources pour que le Brésil aille au-delà de ses engagements de Copenhague et puisse participer à l'effort global de diminution des émissions de GES de moitié à l'horizon 2050. Compte-tenu des longs délais de stockage du carbone des forêts en croissance, la lutte contre la disparition du couvert forestier s'avère beaucoup plus efficace que les actions de reforestation. Le Rapport Stern (2006) la considère comme une méthode plus rentable que beaucoup d'autres mesures d'atténuation, à condition que des progrès soient enregistrés en matière de gouvernance. Le Fonds Amazonie, créé en 2008 et géré par la BNDES (Banque nationale de développement économique et social), bénéficie déjà d'une aide publique de la Norvège et de soutiens privés pour appuyer des actions de prévention, de contrôle, de conservation et d'exploitation durable. Ces actions préfigurent celles qui seront menées dans le cadre du mécanisme REDD et facilite la définition en cours d'une stratégie nationale.

Bibliographie

ANG, B.W. (2004), "Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method ?", *Energy Policy*, vol. 32, n° 9, p. 1131–1139.

ARAUJO, C., ARAUJO BONJEAN, C., COMBES, J.-L., COMBES MOTEL, P. et REIS, E. (2009), "Property rights and deforestation in the Brazilian Amazon", *Ecological Economics*, Elsevier, vol. 68, n° 8-9, p. 2461–2468.

ASSUNÇÃO, J., GANDOUR, C. et ROCHA, R. (2012), "Deforestation Slowdown in the Legal Amazon: Prices or Policies ?", *Climate Policy Initiative Working Paper*, PUC-Rio de Janeiro.

AZEVEDO-RAMOS, C. (2008), « Développement durable et lutte contre la déforestation en Amazonie brésilienne », *Unasylva FAO*, n° 230, vol. 59.

BACON, R. et BHATTACHARYA, S. (2007), "Growth and CO₂ Emissions: How do different Countries Fare?", *Environment Department Paper*, n° 113, Word Bank.

BERG, C. (2004), *World Fuel Ethanol Analysis and Outlook*, Ratzeburg, Germany: F.O. Licht.

BNDES – Banque nationale de développement économique et social (2009), *Fonds Amazonie - Rapport annuel d'activité*.

CAISSE DES DEPOTS (2008), "Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts : Quelle contribution de la part des marchés du carbone ?", *Etude Climat*, n° 14.

CCNUCC – Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (2006), *Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie*, Décision 16/CMP.1

CENTER FOR CLEAN AIR POLICY (2006), "Greenhouse Gas Mitigation in Brazil, China and India : Scenarios and Opportunities through 2025", *Developing Country Analysis*, Washington.

CHOMITZ, K. M., BUYS, P., DE LUCA, G., THOMAS, T. S., et WERTZ-KANOUNNIKOFF, S. (2007), "At Loggerheads ? Agricultural Expansion, Poverty Reduction, and Environment in the Tropical Forests", *Policy Research Report*, The World Bank.

COMMONER, B. (1972), "A Bulletin dialogue on the 'Closing Circle', Response to Ehrlich and Holdren", *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 28, n° 5, p. 42-56.

CRIQUI, P., PEYTRAL, P.-O. et SIMON, J.-C. (2010), *Fostering low carbon growth initiatives in Thailand*, LEPII-CNRS, Rapport de recherche.

CRUTZEN, P., MOSIER, A., SMITH, K. et WINIWARTER, W. (2008), "N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels", *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, n° 2.

DE FREITAS, L. C. et KANEKO, S. (2011a), "Decomposition of CO₂ emissions change from energy consumption in Brazil: Challenges and policy implications," *Energy Policy*, Elsevier, vol. 39, n° 3, p. 1495-1504.

DE FREITAS, L. et KANEKO, S. (2011b), "Decomposing the decoupling of CO₂ emissions and economic growth in Brazil," *Ecological Economics*, Elsevier, vol. 70, n° 8, p. 1459-1469.

DE GOUVELLO, C. (2010), *Brazil Low-carbon Country Case Study*, The World Bank.

DIVISIA, F. (1926), "L'Incidence monétaire et la théorie de la monnaie", *Revue d'économie politique*, tome 39, n° 6, p. 1121-1151.

EHRlich, P. R. et HOLDREN, J. P. (1971), "Impact of Population Growth", *Science*, 171, p. 1212-1217.

EHRlich, P. R. et HOLDREN, J. P. (1972), "A Bulletin dialogue on the 'Closing Circle', Critique- One-dimensional ecology, *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 28, n° 5, p.16-27.

FEARNSIDE, P. M. (2005), "Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências", *Megadiversidade-Conservação internacional do Brasil*, vol. 1, n° 1.

GALINDO, L. M. et SAMANIEGO, J. (2010), "La Economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados", *Revista Cepal*, n° 100, p. 69-96.

GOVERNO FEDERAL (2008) - Comitê interministerial sobre mudança do clima, *Plano Nacional sobre Mudança do Clima*, Brasília.

GIEC (2003), *Recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques pour le secteur UTCATF*, OMM-PNUE, IGES.

GIEC (2006), *Lignes directrices pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, volume 4, Agriculture, foresterie et autres affectations des terres*, OMM-PNUE.

GIEC (2007), *Changements climatiques - Rapport de synthèse*, OMM-PNUE.

GROSSMAN, G. et KRUEGER, A. (1995), "Economic Growth and the Environment", *Economic Journal*, n° 110, p. 353-77.

Groupe de travail III (2007), *Contribution au 4^{ème} Rapport d'évaluation du GIEC, Bilan 2007 des changements climatiques : l'atténuation des changements climatiques*, Résumé technique.

HOUGHTON, R. A. (2003), *Emissions (and Sinks) of Carbon from Land-Use Change*, Report to the World Resources Institute from the Woods Hole Research Center.

KAYA, Y. (1990), "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios", *Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group*, Paris.

KOJIMA, M. et BACON, R. (2009), "Changes in CO₂ Emissions from Energy Use – A Multicountry Decomposition Analysis", *Extractive Industries for Development Series 11*, The World Bank.

LUUKKANEN, J. et KAIVO-OJA, J. (2002), "Meaningful Participation in Global Climate Policy? Comparative Analysis of the Energy and CO₂ Efficiency Dynamics of Key Developing Countries", *Global Environmental Change*, vol. 12, n° 2, pp. 117-126.

MACHADO, G. et SCHAEFFER, R. (2006), "Chapter 5 - Energy and Economic Development", *Brazil: A Country Profile of Sustainable Energy Development*, IAEA - International Atomic Energy Agency, Vienne.

MATHER, A. (1992), "The Forest Transition", *Area*, vol. 24, n° 4, p. 367-379.

MEUNIE, A. (2004), « Controverses autour de la courbe environnementale de Kuznets », *Document de travail*, n° 107, Centre d'économie du développement, Bordeaux IV.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA (2006), *Brazilian Energy Balance – year 2005*, EPE, Brasília.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA (2011), *Brazilian Energy Balance – year 2010*, EPE, Brasília.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (2010), *Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal – Parte 2*, Brasília.

PNUMA - Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2010), *Gráficos Vitales del Cambio Climático para América Latina y el Caribe*, PNUMA-CEPAL-GRID, Edición especial para la CP16/CP-RP 6, México.

RAUPACH, M., MARLAND, G., CIAIS, P., LE QUÉRÉ, C., CANADELL, J., KLEPPER, G. et FIELD, C. (2007), "Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions", *PNAS*, vol. 104, n° 24, p. 10288-10293, Harvard University, Cambridge.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL (2010), *Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Global do Clima*, Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/326751.html>.

ROGNER, H., ZHOU, D., BRADLEY, R., CRABBÉ, P., EDENHOFER, O., HARE B., KUIJPERS, L. et YAMAGUCHI, M. (2007), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate – Introduction*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

RORMOSE, P. et OLSEN, T. (2005), “Structural Decomposition Analysis of Air Emissions in Denmark 1980-2002”, *15th International Conference on Input-Output Analysis, Beijing, China, June 27 to July*.

SHEINBAUM, C., OZAWA, L. et CASTILLO D. (2010), “Using logarithmic mean Divisia index to analyse changes in energy use and carbon dioxide emissions in Mexico’s iron and steel industry”, *Energy Economics*, n° 32, p. 1337-1344.

SIMONET, G. (2011), « Conférence climatique de Durban : l’enjeu de la mesure des flux de carbone forestier », *Les Cahiers de la Chaire Economie du Climat*, n° 12.

SOUZA DE MEDEIROS, H. et ARDUINO DEZIDERA, D. (2006), « Emissões de CO₂ na Economia Brasileira: uma Análise de Decomposição », *Revista Brasileira de Energia*, Vol.12, n°2, p.1-8.

STERN, N. (2006), “The Economics of Climate Change: The Stern Review”, London, Her Majesty Treasury.

STERNER, T. (2011), “Engagements volontaires et croissance verte dans l’ère d’après Copenhague”, *Revue d’économie du développement*, vol. 25, n° 4, p. 115-151.

TORNQVIST, L., VARTIA, P. et VARTIA, Y. O. (1985), “How should relative changes be measured?”, *The American Statistician*, n° 39, p.43-46.

VERÍSSIMO, A., ROLLA, A., VEDOVETO, M. et DE FURTADA et S.M. (2011), *Protected Areas in the Brazilian Amazon: challenges and opportunities*, Imazon / ISA (Instituto Socioambiental).